





# Machines thermiques

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, idéalement à la fin d'un cours ou éventuellement par mail.

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	Exercice I
	Ceinture jaune	Exercice I
	Ceinture rouge	Exercice II
	Ceinture noire	Exercice II



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

## I - Moteur d'Ericsson

Le moteur d'Ericsson, conçu au XIX<sup>e</sup> siècle par l'ingénieur suédois John Ericsson, s'inscrit dans la lignée des premières machines thermiques. Développé comme alternative plus sûre aux machines à vapeur, il a connu un certain succès industriel, notamment dans les applications maritimes et les systèmes de pompage. Malgré des performances limitées face aux moteurs à combustion interne, son principe a suscité un intérêt durable. Aujourd'hui, il inspire des recherches en énergétique, notamment pour des systèmes utilisant des sources de chaleur renouvelables. Comme le moteur de Stirling, il a en effet l'avantage d'être utilisable avec n'importe quelle source de chaleur, et pas forcément une combustion interne.

Le moteur d'Ericsson est une machine thermique à écoulement de fluide, parcourue par de l'air, décrit comme un gaz parfait d'indice adiabatique  $\gamma = 7/5$ , qui subit la suite de transformation suivantes :

- $A \rightarrow B$  (compresseur) : compression isotherme à la température  $T_1$  partant de  $P_A = P_1$  jusqu'à  $P_B = P_2$  ;
- $B \rightarrow C$  (échangeur thermique) : échauffement isobare de la température  $T_B = T_1$  jusqu'à  $T_C = T_2$  ;
- $C \rightarrow D$  (turbine) : détente isotherme ;
- $D \rightarrow A$  (échangeur thermique) : refroidissement isobare.

On introduit  $r = P_2/P_1 > 1$  (taux de compression) et  $x = T_2/T_1 > 1$ .

Donnée : capacités thermique isochore d'un gaz parfait  $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$ .

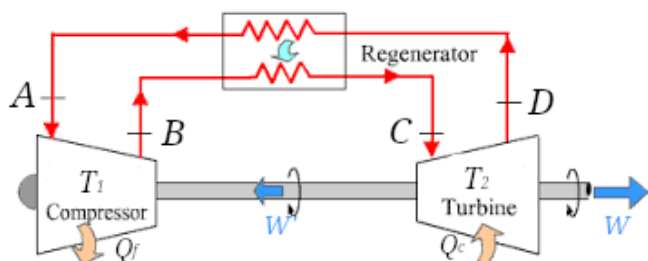
On étudie le cycle d'Ericsson en isolant par la pensée une petite quantité d'air  $n$ , très inférieure à la quantité totale d'air présente dans la machine. Cette démarche permet d'assimiler cette petite quantité à un système fermé subissant successivement les différentes étapes du cycle, exactement comme dans une machine à pistons.

1 - Représenter l'allure du cycle d'Ericsson dans le diagramme de Watt relatif à cette petite quantité d'air.

2 - Exprimer en fonction de  $T_1$ ,  $\gamma$ ,  $x$  et  $r$  les travaux et transferts thermiques  $W_{ij}$  et  $Q_{ij}$  échangés au cours des différentes étapes du cycle.

3 - Dans une première approche naïve, on suppose que tous les transferts thermiques sont échangés avec les sources de chaleur. Exprimer le rendement du cycle en fonction des quantités calculées à la question précédente.

4 - Déterminer le rendement du cycle, d'abord littéralement en fonction de  $\gamma$ ,  $x$  et  $r$ , puis numériquement pour  $r = 5$  et  $x = 2$ .



En réalité, le fait que le moteur d'Ericsson soit une machine à écoulement de fluide permet d'optimiser son fonctionnement :

- d'une part, le travail nécessaire à la compression peut être prélevé à la turbine, simplement en reliant turbine et compresseur au même arbre ;
- d'autre part, puisque le cycle met en œuvre un échauffement et un refroidissement, il est possible d'utiliser un seul et même échangeur dans lequel le gaz chaud se refroidit tout en réchauffant le gaz froid.

5 - Montrer que la turbine produit suffisamment de travail pour entraîner le compresseur tout en conservant la possibilité d'entraîner en rotation une charge mécaniquement reliée à la turbine. En déduire le travail  $W$  réellement produit par la machine.

6 - En supposant l'échangeur globalement calorifugé (c'est-à-dire sans aucune fuite thermique vers l'environnement), montrer qu'il suffit à assurer les étapes  $BC$  et  $DA$  sans intervention des sources.

7 - Établir l'expression du rendement réel du cycle, et le calculer. Comparer à la valeur précédente.

## II - Réfrigérateur

*La difficulté majeure de l'exercice est d'identifier correctement le système et les transformations sur lesquels raisonner. Vous serez donc particulièrement vigilants à les préciser très explicitement.*

On s'intéresse l'évolution de la température  $T$  à l'intérieur d'un réfrigérateur, supposée uniforme mais susceptible de varier dans le temps. Sa température en régime stationnaire est notée  $T_f$ . La source chaude est la cuisine dans laquelle est installé le réfrigérateur, de température  $T_c$  constante. L'efficacité du réfrigérateur dépend de sa température, et vaut

$$e = \frac{T}{4(T_c - T)}.$$

Les parois du réfrigérateur ont une résistance thermique totale  $R$ . On considérera que l'intérieur du réfrigérateur a une capacité thermique totale  $C = 3 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

### II.A - Préambule

8 - Récapituler sous forme d'un diagramme les différents échanges énergétiques mis en jeu. Le diagramme fera apparaître le fluide frigorigène du réfrigérateur, le contenu de son compartiment réfrigéré, l'air de la cuisine et le compresseur du circuit réfrigérant. On respectera la convention usuelle stipulant que le fluide frigorigène reçoit des énergies algébriques. Préciser le signe des différentes énergies échangées.

9 - Montrer que l'efficacité du réfrigérateur peut être reliée à la puissance thermique  $\mathcal{P}_{fr}$  prélevée à la source froide et à la puissance mécanique  $\mathcal{P}_m$  fournie par le compresseur par

$$e = \frac{\mathcal{P}_{fr}}{\mathcal{P}_m}.$$

Pas de « c'est évident » qui tienne (même si c'est un peu vrai ...), mais un raisonnement propre basé sur un système et une transformation clairement explicités (mais n'allez pas chercher trop compliqué pour autant).

### II.B - Évaluation des fuites thermiques

Pour évaluer les fuites thermiques du réfrigérateur, on le débranche à  $t = 0$  alors que l'intérieur du réfrigérateur est à une température initiale  $T_f$ .

10 - Établir l'équation différentielle vérifiée par la température  $T$ .

11 - En exploitant la figure 1, déterminer  $T_c$ ,  $T_f$  et  $R$ .

12 - Lorsque le réfrigérateur est branché depuis longtemps, sa température interne est réglée à  $T_f$ . Estimer la puissance mécanique  $\mathcal{P}_m$  du compresseur permettant de compenser les fuites.

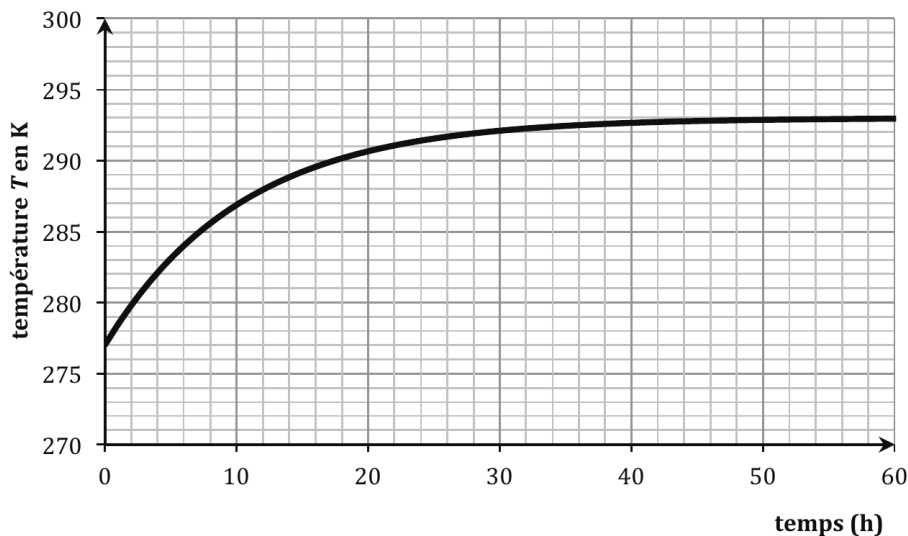


Figure 1 – Évolution temporelle de la température du réfrigérateur débranché.

### II.C - Démarrage du réfrigérateur

On suppose le réfrigérateur débranché depuis suffisamment longtemps pour que sa température interne soit égale à  $T_c$ , et on le met en route à l'instant  $t = 0$ . On cherche à estimer la durée de refroidissement  $\Delta t_r$  nécessaire pour que sa température interne atteigne la valeur de consigne  $T_f$ .

En pratique, le compresseur d'un réfrigérateur n'est pas allumé en continu mais alterne entre des phases actives où il échange une puissance constante égale à  $4\mathcal{P}_m$  avec le fluide frigorigène, et des phases inactives où il est éteint. Au démarrage, le compresseur est actif tant que la température de consigne n'est pas atteinte.

13 - Pourquoi n'est-il pas possible que le réfrigérateur fonctionne avec une puissance du compresseur  $\mathcal{P}_m$  constante ?

14 - Établir l'équation différentielle vérifiée par la température  $T$ .

15 - Cette équation ne pouvant être résolue analytiquement, on cherche une estimation de la durée de refroidissement  $\Delta t_r$  en supposant les fuites thermiques négligeables. Simplifier l'équation différentielle et déterminer  $\Delta t_r$  dans cette hypothèse.

16 - Estimer par une approximation simple l'ordre de grandeur de l'énergie reçue par l'intérieur du frigo en raison des fuites thermiques sur cette durée. Comparer à sa variation d'énergie totale. Négliger les fuites semble-t-il justifié ?